

В диссертационный совет Д 002.075.01
при ФГБУН Институте проблем машиноведения РАН
Б.О., Большой пр., 61, Санкт-Петербург, Россия, 199178

ОТЗЫВ

официального оппонента

Гольдштейна Роберта Вениаминовича

на диссертацию **Скибы Николая Васильевича** на тему

«Взаимодействие мод пластической деформации и их влияние на зарождение и рост трещин в нанокристаллических твердых телах»,

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальностям

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела,

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Диссертация Н.В. Скибы посвящена разработке фундаментальных основ создания нанокристаллических материалов с повышенными характеристиками пластичности и трещиностойкости. Эта проблема весьма актуальна в связи с развитием нанотехнологий и растущими потребностями в использованииnanoструктурных материалов в различных областях техники и медицины. Сложность проблемы во многом обусловлена тем, что требования к параметрам структуры материала для повышения его пластических свойств и сопротивления разрушению часто противоречивы. Так, во многих материалах предел текучести повышается при уменьшении размера зерна в определенных пределах, в то время как для увеличения трещиностойкости необходимо размер зерна увеличивать.

Переход к наномасштабным структурам открывает новые возможности для направленного изменения служебных характеристик материала посредством управления параметрами его структуры. Эти возможности обусловлены, в частности, наличием в нанокристаллических материалах нескольких механизмов пластического деформирования, конкуренцией процессов, происходящих в объеме структурных элементов и на их границах.

Диссертация посвящена систематическому теоретическому исследованию различных мод пластической деформации, установлению закономерностей их взаимодействия и оценке влияния этих мод на процессы упрочнения и разупрочнения, зарождения и роста трещин в нанокристаллических материалах.

Диссертация состоит из введения и четырех глав. Изложение подкрепляется ссылками на 209 публикаций по теме. Основное содержание работы отражено в 36 публикациях автора.

Во введении автор отмечает механизмы пластической деформации, присущие нанокристаллическим материалам, такие, как межзеренное скольжение, ротационная деформация, скольжение решеточных дислокаций, испускаемых из границ зерен, диффузионный массоперенос по границам зерен и тройным стыкам, деформация двойникованием, формирование нанозерен меньшего размера, чем исходные.

Главы 1-4 посвящены построению и анализу физико-механических моделей указанных механизмов, условий их реализации и особенностей взаимодействия. Методической основой приводимых построений служат подходы и методы математической теории упругости, предоставляющих исследователю большое разнообразие аналитических

решений, описывающих упругие поля носителей рассматриваемых механизмов пластических деформаций.

Диссертантом найдено удачное сочетание изложения разработанных моделей собственно механизмов пластической деформации и их применения для описания тех или иных эффектов и характеристик пластичности и разрушения нанокристаллических материалов.

Так, в Главе 1 сначала предложены модели взаимодействия межзеренного скольжения и ротационной деформации, условия перехода от одного механизма к другому, а также модель испускания частичной дислокации из границы зерна, обеспечивающего аккомодацию межзеренного скольжения. Затем эти результаты использованы для анализа специфики сверхпластических деформаций нанокристаллических тел, обусловленных межзеренным скольжением. Выполнено моделирование процессов упрочнения и разупрочнения при сверхпластической деформации. Построена теоретическая зависимость напряжений течения от деформации для нанокристаллического алюминий-литиевого сплава. Расчетная кривая имеет зубчатую форму и хорошо согласуется в среднем с экспериментальной.

Появление зубчатости соотносится с актами решеточного скольжения. Заметим, что похожая зависимость характерна для решеточной модели трещины, предложенной Р. Томсоном, который называл участок зубчатости «спиной динозавра».

Глава 2 посвящена моделированию механизма пластической деформации нанокристаллических материалов по механизму образования деформационных двойников на границах зерен. Рассмотрены две схемы зарождения двойника. Согласно одной из них нанодвойник образуется вследствие эмиссии частичных дислокаций Шокли в зоне концентрации напряжений, создаваемой либо двухосным диполем стыковых клиновидных дисклинаций, либо вершиной трещины смешанного типа (нормального отрыва и поперечного сдвига). Другая схема использует механизм образования множественных наномасштабных сдвигов внутри наноразмерной области, расположенной вблизи вершины микротрещины нормального отрыва. Построены зависимости толщины и формы двойников от параметров каждой из схем. Эти возможности согласуются с опубликованными экспериментальными данными. Далее, получена оценка влияния нанодвойника на критический коэффициент интенсивности напряжений для трещин микромасштаба и условия его возрастания.

В Главе 3 рассмотрен вопрос о возможных механизмах релаксации напряжений несоответствия в нанокристаллических пленках (покрытиях).

Разработана модель, согласно которой релаксация напряжений несоответствия обусловлена межзеренным скольжением, приводящим к образованию ансамблей диполей дисклинаций. Другой механизм релаксации напряжений несоответствия в нанокристаллических пленках автор соотносит с процессом ускоренного диффузационного массопереноса по границам зерен возможным в нанокристаллическом состоянии. Предложена модель, описывающая данный механизм. В рамках каждой из двух моделей получены оценки эффективности соответствующего механизма релаксации напряжений несоответствия для конкретных систем пленка-подложка при различных структурных параметрах.

В Главе 4 предложен микромеханизм торможения трещин в нанокристаллических материалах, в соответствии с которым эффект торможения обусловлен зарождением и формированием наномасштабных зерен меньших, чем исходные зерна нанокристаллической структуры, вблизи вершины трещины. Построена модель, описывающая этот механизм. Согласно модели зарождение нанозерен происходит в

следующей последовательности событий: расщепление границы исходного зерна с образованием подвижной ее части, миграция этой части границы, образование двух новых границ, которые вместе с неподвижной и подвижной частями границы исходного зерна, формируют контур (границу) нового зерна меньшего размера. Указанные процессы стимулируют пластический сдвиг в области вершины трещины. Описав соответствующее ему упругое поле упругим полем двух диполей клиновидных дисклинаций, автор нашел условия реализации предложенного механизма и оценил его влияние на трещиностойкость нанокристаллического материала.

Результаты, представленные в диссертации, достоверны, поскольку при построении моделей использованы обоснованные физико-механические принципы, а при математическом описании моделей – аналитические решения соответствующих задач теории упругости для тел с дефектами и трещинами. Кроме того, автору в ряде случаев удалось подтвердить результаты модельных расчетов опубликованными данными экспериментов.

Результаты диссертации имеют практическую значимость, так как указывают некоторые пути для повышения характеристик пластичности и трещиностойкости нанокристаллических материалов.

Замечания по диссертации

1. При использовании аналитических решений ряда задач теории упругости для анализа предложенных в диссертации моделей приняты некоторые упрощающие предположения. Было бы полезно дать оценки погрешностей, вносимых применяемыми упрощающими предположениями. К таким упрощающим предположениям относятся, в частности:

- возможность пренебречь влиянием внешних и межзеренных границ на распределение напряжений, вызывающих движение дислокаций (в работе межзеренные границы учитываются лишь в качестве допустимых траекторий движения дислокаций);
- возможность не учитывать анизотропию кристаллической решетки отдельных зерен, которая влияет как на их упругие свойства, так и на распределение напряжений, ответственное за движение дислокаций.

2. В работе получены достаточные условия реализации тех или иных механизмов пластического деформирования. Нужно было бы построить или хотя бы обсудить соответствующие необходимые условия.

3. На стр. 21 написано, что «первая производная полинома Лагерра является решением уравнения (приводится уравнение) и определяется неравенством ... (1.5)». Однако 1.5 является равенством.

4. На стр. 34. указано, что «вид полученных в результате кривых $\tau(d)$ не очень чувствителен к выбору параметров, они просто должны быть разумными по порядку величины». Желательно было бы привести численные оценки данного влияния.

5. Один из механизмов пластической деформации рассмотренный в работе – формирование нанодвойников. В связи с этим целесообразно было бы сравнить результаты диссертанта с результатами публикаций Xiaoyan Li., Yujie Wei, Lei Lu, Ke Lu & Huajian Gao “Dislocation nucleation governed softening and maximum strength in nano-twinned metals”. Nature. Letters. 2010, v. 464, No. 8, p. 877-880. В указанной статье, в частности, показано, что толщина двойников и расстояние между ними не только определяют уровень прочности, но и обеспечивают смену механизмов деформирования. Более того, имеет место не монотонная зависимость прочности от расстояния между границами двойников.

Указанные замечания не снижают положительной оценки работы в целом.

В работе систематически развит подход к моделированию сложных процессов пластического деформирования нанокристаллических материалов и в рамках этого подхода разработаны модели и построены оценки характеристик пластичности и трещиностойкости в зависимости от параметров структуры. Работа выполнена автором на высоком научном уровне на стыке механики деформируемого твердого тела и физики конденсированного состояния.

Основные результаты работы отражены в 36 публикациях в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание работы. Диссертация написана технически квалифицированно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

Диссертация отвечает требованиям Положения ВАК МИНОБРНАУКИ РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, ее автор Скиба Николай Васильевич вполне заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела и 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук

Профессор физики, член-корреспондент РАН,

Зав. Лабораторией механики прочности и разрушения
материалов и конструкций ФГБУН Института проблем
механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

почтовый адрес: 119526, Москва, пр. Вернадского, 101-1

e-mail: goldst@ipmnet.ru, тел.: 8(495)4343527

подпись *Р. В. Гольдштейн*
Зап. Канцелярией
"22.09.2014" И.А. Сафонова



Р. В. Гольдштейн